

Introdução aos Processos de Separação

Prof. Rodolfo Rodrigues
Universidade Federal do Pampa

BA310 – Operações Unitárias II
Curso de Engenharia Química
Campus Bagé

14 de agosto de 2018



Informações de Contato

Rodolfo Rodrigues, Dr. Eng.

Professor de Engenharia Química

Sala: **2108 (Sala dos professores 1)** ou

LEC (Lab. de Energia e Carboquímica)

E-mail: rodolfo@unipampa.edu.br

Website: rodolfo.chengineer.com



Introdução



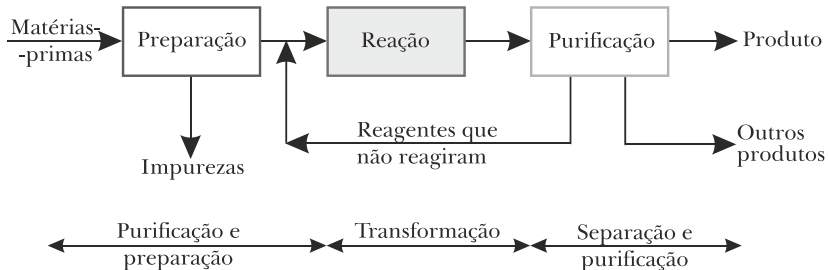


Figura 1: Representação esquemática de um processo químico genérico.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

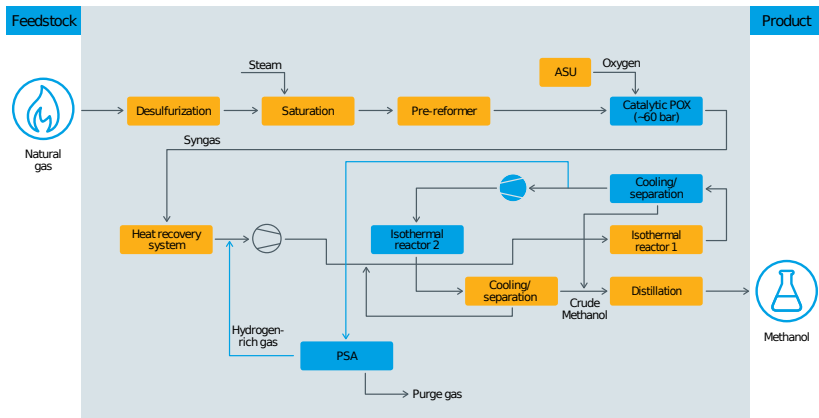


Figura 2: Fluxograma de planta de produção de metanol a partir da oxidação parcial catalítica de gás natural.

Fonte: Thyssenkrupp (2018).





Figura 3: Planta de metanol com capacidade de 140 mil t/d localizada em Schwarze Pumpe na Alemanha.

Fonte: Thyssenkrupp (2018).

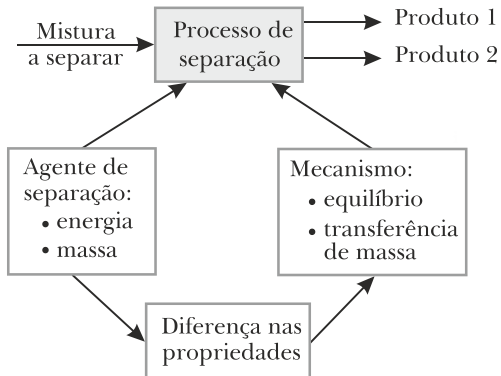


Figura 4: Esquema geral de um processo de separação.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

Tipos de processos de separação

- Separação por adição ou criação de fase:
 - **Destilação;**
 - **Absorção e**
 - **Extração líquido-líquido.**
- Separação por barreira ou agente sólido:
 - Separação por membrana;
 - **Adsorção;**
 - Troca iônica, cromatografia e eletroforese.
- Separação envolvendo uma fase sólida:
 - **Extração sólido-líquido;**
 - Cristalização;
 - Evaporação e secagem.
- Separação mecânica de fases:
 - Filtração, precipitação, decantação e centrifugação.

Componente Curricular



Componente Curricular

Informações Básicas

BA000310 Operações Unitárias II

- **Carga horária:** 60 h (4 créditos) teóricas.
- **Curso:** Engenharia Química.
- **Docente:** Rodolfo Rodrigues.
- **Pré-requisito:** 1950 h (130 créditos) cursados.
- **Pré-requisito recomendado:**
 - Geometria Analítica;
 - Cálculo II;
 - Desenho Técnico I;
 - Físico-Química II;
 - Cálculo Numérico;
 - Estequiometria Industrial e
 - Fenômenos de Transporte III.



Componente Curricular

Ementa

- 1 Operações por estágios;
- 2 Destilação;
- 3 Absorção;
- 4 Extração líquido-líquido;
- 5 Extração sólido-líquido e
- 6 Adsorção.



Componente Curricular

Objetivo Geral

- **Apresentar** as principais **operações unitárias** da indústria química que envolvem **transferência de massa e equilíbrio de fases** através da **descrição, função, operação e projeto** dos principais **equipamentos** industriais onde estas operações são aplicadas.



Componente Curricular

Objetivos Específicos

- **Aplicar** técnicas numéricas, analíticas e gráficas na resolução dos diversos problemas de separação envolvendo transferência de massa e equilíbrio de fases.
- **Conhecer** a representação do equilíbrio termodinâmico em diagramas de fases de sistemas binários e ternários.
- **Conhecer** o princípio de funcionamento e identificar as principais variáveis de operação dos equipamentos utilizados para separação.



Componente Curricular

Objetivos Específicos

- **Calcular** o número de estágios de equilíbrio necessários para realizar uma separação de dois (ou mais) componentes através de processos de destilação, absorção e extração.
- **Dimensionar** vasos e colunas de separação.
- **Conhecer** noções básicas de manipulação de pacotes computacionais específicos para a simulação de problemas de separação.



Componente Curricular

Metodologia

- **Aulas expositivas e exercícios propostos** para resolução em sala de aula e extraclasse de forma individual e/ou em grupo.
 - A resolução dos exercícios propostos necessitarão preferencialmente de **régua 30 cm** e **calculadora científica** os quais são de responsabilidade do discente.
- Aulas computacionais com exercícios propostos em simuladores de processos industriais: **ChemSep** e **UniSim Design**.



Componente Curricular

Avaliação do Processo de Ensino-Aprendizagem

- A avaliação será realizada através de atividade extraclasse (**um projeto extraclasse**) e de provas escritas parciais (**três provas parciais**).
- A nota final (**NF**) é o resultado de:

$$NF = (0,75 * N1) + (0,25 * N2)$$

- **N1** é a média aritmética das notas das **3 provas parciais** (75% da nota final) e
- **N2** é a nota do **projeto extraclasse** utilizando o simulador *UniSim Design* (25% da nota final)

Componente Curricular

Avaliação do Processo de Ensino-Aprendizagem

- Se $NF \geq 6,0$ o discente será considerado **aprovado**.
- Se $NF < 6,0$ o discente será considerado **reprovado**.
- Para os discentes que não alcançarem a $NF \geq 6,0$ será realizada uma **prova recuperativa (PR)**.
 - A **PR** incluirá o conteúdo total da disciplina e comporá 60% da nova nota final.
 - Neste caso, a nova nota final (NF^*) é o resultado de:
$$NF^* = (0,4 * NF) + (0,6 * PR).$$
- Além disso, para que o discente seja aprovado ele deverá ter no **frequência nas aulas $\geq 75\%$** .

Componente Curricular

Atividades de Recuperação Preventiva

- As atividades de recuperação de ensino serão **exercícios extraclasse, atendimentos extraclasse, exercícios desenvolvidos em sala de aula e prova recuperativa.**
- A verificação do processo ensino-aprendizagem será realizada constantemente através dos resultados das avaliações descritas anteriormente.



Componente Curricular

Bibliografia Básica

- 1 AZEVEDO, E. G.; ALVES, A. M. *Engenharia de Processos de Separação*. Lisboa: IST Press, 2009. (1 exemplar)**
- 2 DUTTA, B. K. *Principles of Mass Transfer and Separation Process*. New Delhi: Prentice Hall of India, 2007.**
- 3 GEANKOPLIS, C. J. *Transport Processes and Separation Process Principles (Includes Unit Operations)*. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003. (3 exemplares)**



Componente Curricular

Bibliografia Básica

- 4 McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 7. ed. Boston: McGraw-Hill, 2005. (6 exemplares)
- 5 SEADER, J. D.; HENLEY, E. J. *Separation Process Principles*. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. (3 exemplares)
- 6 **WANKAT, P. C. *Separation Process Engineering Includes Mass Transfer Analysis*. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2012.**



Componente Curricular

Bibliografia Complementar

- 1** BLACKADDER, D. A.; NEDDERMAN, R. M. *Manual de Operações Unitárias*. São Paulo: Hemus, 2004. (26 exemplares)
- 2** CALDAS, J. N.; LACERDA, A. I.; VELOSO, E.; PASCHOAL, L. C. M. *Internos de Torres: Pratos & Recheios*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2007. (21 exemplares)
- 3** ERWIN, D. *Projeto de Processos Químicos Industriais*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- 4** FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. *Princípio das Operações Unitárias*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982. (14 exemplares)

Componente Curricular

Bibliografia Complementar

- 5 GOMIDE, R. *Operações Unitárias: Operações de Transferência de Massa*. Vol. 4. São Paulo: R. Gomide, 1988.
- 6 HENLEY, E. J.; SEADER, J. D. *Equilibrium-stage Separation Operations in Chemical Engineering*. New York: John Wiley & Sons, 1981. (3 exemplares)
- 7 HONEYWELL. *UniSim[®] Design Operations Guide*. Versão R440 release. London, Canada, 2015.
- 8 HONEYWELL. *UniSim[®] Design User Guide*. Versão R440 release. London, Canada, 2015.

Componente Curricular

Bibliografia Complementar

- 9 KING, C. J. *Separation Processes*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1980.
- 10 KOOIJMAN, H. A.; TAYLOR, R. *The ChemSep Book*. 2. ed. 2007.
- 11 PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2008. (2 exemplares)
- 12 TREYBAL, R. E. *Mass-Transfer Operations*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1980.

Componente Curricular

Bibliografia Complementar

- 13 LUDWIG, E. E. *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*. Vol. 2. 3. ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 1997.
- 14 WANKAT, P. C. *Rate-controlled Separations*. New York: Springer, 1994. (1 exemplar)



Componente Curricular

Conteúdo Programático Detalhado

- 1 Operações por estágios de equilíbrio;
- 2 Destilação binária:
 - a Destilação (contínua) *flash*;
 - b Destilação (contínua) por estágios e
 - c Destilação em batelada.
- 3 Destilação multicomponente (por estágios);
- 4 Absorção/regeneração;
- 5 Dimensionamento:
 - a Vasos e
 - b Colunas: pratos e recheio.

Componente Curricular

Conteúdo Programático Detalhado

- 6 Extração líquido-líquido;
- 7 Extração sólido-líquido (lixiviação).
- 8 Adsorção:
 - a Batelada e
 - b Contínua.
- 9 Noções de simulação de problemas de separação:
 - a ChemSep e
 - b UniSim Design.



Estágios de Equilíbrio



Operações por Estágios de Equilíbrio

Estágio de Equilíbrio

- 1 Considere que há 2 fases em contato íntimo;
- 2 Ocorre transf. de massa dos componentes das fases;
- 3 Após, as fases são separadas;
- 4 Se o tempo de contato/mistura é longo:
Os componentes estarão em equilíbrio físico nas 2 fases após a separação, ou seja, não há mais transf. de massa.



Operações por Estágios de Equilíbrio

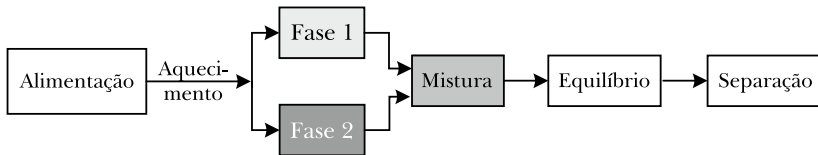


Figura 5: Ilustração do conceito de **estágio de equilíbrio**. As **fases 1 e 2** podem ser formadas a partir de **uma única corrente** (por ex., por aquecimento como ocorre na destilação) ou por **mistura de 2 correntes** (por ex., como ocorre na extração). Todos as etapas ilustradas ocorrem em cada um dos estágios de equilíbrio.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

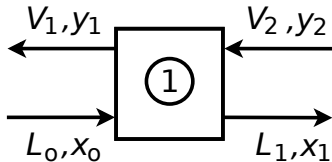
Operações por Estágios de Equilíbrio

Considerações:

- Operação contínua, geralmente;
- Operação em estado estacionário;
- Mistura binária (A + B), geralmente.

Convenções:

- V é a fase "leve" e L é a fase "pesada";
- y é a composição da fase "leve" e x é a composição da fase "pesada";
- Uma corrente é identificada pelo n° do estágio do qual ela se originou.



Operações por Estágios de Equilíbrio

Equacionando:

BMG:

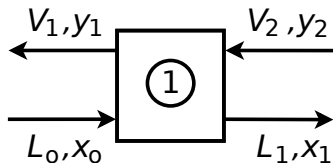
$$L_0 + V_2 = L_1 + V_1 \quad (1)$$

BMC:

$$\begin{aligned} L_0 \cdot x_0 + V_2 \cdot y_2 = \\ L_1 \cdot x_1 + V_1 \cdot y_1 \end{aligned} \quad (2)$$

Relação de equilíbrio:

$$K = \frac{y_1}{x_1} \quad (3)$$



Operações por Estágios de Equilíbrio

Fator de Separação

Coefficiente de distribuição ou constante de equilíbrio ("K-value"):

$$K_i = \frac{\text{composição de } i \text{ na fase "leve"}}{\text{composição de } i \text{ na fase "pesada"}} = \frac{y_i}{x_i} \quad (4)$$

Desta forma, $K = 1$ significa que a separação é impossível!

Obs.: Para um mistura binária, K é sempre expresso para o componente mais volátil. Assim, $K \geq 1$ sempre.



Operações por Estágios de Equilíbrio

Múltiplos Estágios ou Multiestágios

- $K \gg 1$:
Um único estágio pode ser suficiente para atingir a separação desejada;
- $K \approx 1$:
Múltiplos estágios são necessários para atingir a separação desejada. **Na prática, é o caso mais comum!**
- Na prática, multiestágios são utilizados para reduzir a massa e a energia gastas na operação de separação.



Destilação “Flash”



Destilação *Flash*

Destilação *Flash* ou Destilação de Equilíbrio

- É uma operação de **separação contínua** de um **único estágio de equilíbrio** onde uma mistura líquida de 2 ou mais componentes é parcialmente vaporizada através da passagem por uma válvula de expansão;
- As fases são posteriormente separadas e removidos em um recipiente chamado de **tanque** ou **vaso**;
- É usada na indústria como uma **pré-separação** ou **operação auxiliar** de preparação de correntes que para uso em tipos de separação mais eficientes.



Destilação *Flash*

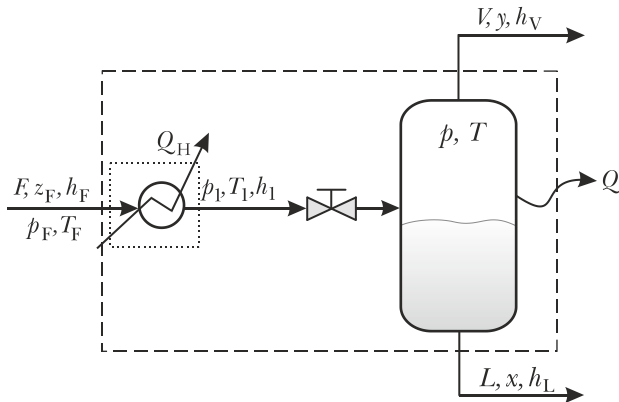


Figura 6: Representação da destilação *flash*.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

Destilação *Flash*

BMG:

$$F = V + L \quad (5)$$

BMC:

$$F \cdot z = V \cdot y + L \cdot x \quad (6)$$

Definindo a fração da alimentação que é vaporizada como $f = V/F$ e a partir das eqs. 5 e 6, têm-se:

$$y = \frac{F}{V}z - \frac{L}{V}x \quad (7)$$

$$y = \left(\frac{f-1}{f} \right) x + \frac{z}{f}$$



Destilação Flash

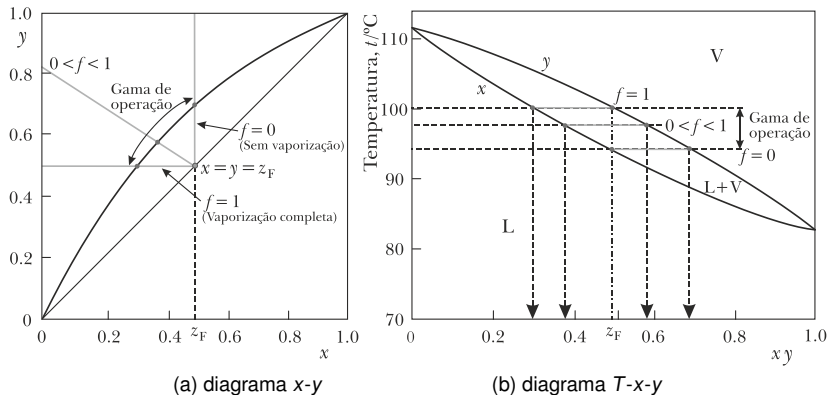


Figura 7: Representação gráfica da destilação *flash* a pressão constante: (a) diagrama $x-y$; (b) diagrama $T-x-y$.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

- AZEVEDO, E. G.; ALVES, A. M. **Destilação Súbita**. In: _____. (Org.). *Engenharia de Processos de Separação*. 2. ed. Lisboa: IST Press, 2013, p. 69-98.
- WANKAT, P. C. **Flash Distillation**. In: _____. (Org.). *Separation Process Engineering Includes Mass Transfer Analysis*. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2012, p. 13-77.